

Проектирование бесконтактного выключателя аварийных режимов

в тиристорном преобразователе повышенной частоты для индукционного нагрева металлов

В статье рассмотрены вопросы проектирования быстродействующей защиты от аварийных режимов тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ), в частности — разработка для них бесконтактного тиристорно-конденсаторного выключателя (ТКВ). Автономный независимый инвертор тиристорного преобразователя повышенной частоты получает питание от неуправляемого выпрямителя, подключенного к трехфазной сети переменного тока через устройство аварийного отключения — тиристорный выключатель постоянного тока.

Юрий Зинин, к. т. н.

umz42@mail.ru

Семен Шапиро, д. т. н.

svshap@ufacom.ru

Александр Белкин

bak18@mail.ru

Приведены результаты моделирования переходных процессов в тиристорном преобразователе и бесконтактном ТКВ, выполненные с помощью современной программы схемотехнического моделирования — симулятора Micro-Cap. При создании схемотехнической модели тиристорного инвертора и бесконтактного выключателя ТПЧ использованы PSpice-описания основных компонентов — силовых тиристоров и диодов. Установлены параметры ТКВ, определяющие его коммутирующую способность, для применения в ТПЧ индукционного нагрева металлов с выходной мощностью до 200 кВт. Рассмотрены некоторые аспекты применения тиристоров в высокочастотных силовых схемах ТПЧ.

Введение

В установках для индукционного нагрева металлов токами повышенной частоты в настоящее время используются статические тиристорные преобразователи частоты со встроенной системой защиты от аварийных режимов. В составе ТПЧ при проектировании обычно рассматривают следующие функциональные узлы: источник питания — выпрямитель, который подключается к силовой трехфазной сети переменного тока промышленной частоты; устройство быстродействующей бесконтактной защиты — ТКВ; тиристорный инвертор повышенной частоты; нагрузка — индуктор, осуществляющий нагрев металла однофазным током повышенной частоты [1, 3].

Основой для разработки ТПЧ служат преобразователи постоянного напряжения в переменное — высокочастотные инверторы. В настоящее время в ТПЧ для индукционного нагрева все чаще используются тиристорные инверторы, выполненные по симме-

тричной мостовой схеме. Такие ТПЧ разработаны с участием авторов в 70-х годах прошлого века, они прошли несколько поколений разработки, имеют к настоящему времени значительное число модификаций и широко используются в промышленности. Срок эксплуатации мощных ТПЧ в отечественных условиях составляет десятки лет, за это время происходит неоднократное переоснащение инфраструктуры производственных участков, изменение нагрузки и схем подключения ТПЧ к промышленной трехфазной сети 50 Гц.

В качестве источника электропитания ТПЧ, как правило, используют трехфазную мостовую схему выпрямителя, выполненную на тиристорах или неуправляемых диодах. Тиристорный выпрямитель применяется с целью регулирования выходной мощности ТПЧ при необходимости изменения напряжения питания тиристорного инвертора. В этом случае управляемый выпрямитель нужен также для отключения тиристорного инвертора от питающей сети при возникновении аварийных режимов или неисправном состоянии функциональных узлов ТПЧ [4–6].

Стоимость управляемого выпрямителя, выполненного с применением тиристоров, соизмерима со стоимостью автономного тиристорного инвертора — функционального узла, определяющего основные технические параметры ТПЧ (выходную частоту и мощность). Для снижения стоимости ТПЧ целесообразно применение в нем неуправляемого выпрямителя на силовых диодах, который потребляет только активную мощность трехфазной сети, эффективно ее использует и вносит в нее меньшие искажения. Такое подключение эффективно применяется в разработках ТПЧ, созданных в Уфимской школе преобразователей для высокочастотных установок индукционного

нагрева металлов [7, 8], и будет рассмотрено в данной статье.

Для включения/выключения и аварийной защиты ТПЧ в нем используют следующую коммутационную и бесконтактную аппаратуру со стороны питающей сети:

- трехфазный рубильник для отключения при техническом обслуживании;
- быстродействующие силовые предохранители и трехфазный контактор, осуществляющий дистанционное включение/отключение в нормальных режимах эксплуатации ТПЧ; а также соединенные последовательно, по цепи постоянного тока;
- плавкий предохранитель в цепи постоянного тока;
- бесконтактный быстродействующий выключатель, отключающий ТПЧ в аварийных режимах при возникновении неисправности.

Перечисленные устройства защиты должны быть согласованы по техническим характеристикам (току перегрузки и времени срабатывания) и обладать свойством селективности (избирательного действия по отношению к причине возникновения неисправности). Задачей проектирования является определение номинальных параметров бесконтактного быстродействующего выключателя, в первую очередь величины емкости конденсатора защиты, которая определяется током, потребляемым тиристорным инвертором в нормальных режимах эксплуатации, и величиной ограничения «сверхтоков», возникающих в ТПЧ при аварийной ситуации.

Проектируемое устройство бесконтактной защиты включается между источником питания ТПЧ (неуправляемым выпрямителем) и автономным инвертором. Основной функцией быстродействующего конденсаторного выключателя является бесконтактное отключение тиристорного инвертора при возникновении в нем неисправности с целью предотвращения повреждения силовых тиристорных инвертора, диодов выпрямителя, электромеханического контактора и других элементов ТПЧ.

Если защитные характеристики бесконтактной защиты, быстродействующих предохранителей и электромагнитная установка контактора ТПЧ не согласованы между собой, то при возникновении неисправности в ТПЧ в первую очередь повреждаются силовые полупроводниковые приборы — тиристоры инвертора и диоды выпрямителя. Питающая сеть, как правило, имеет «неограниченную» установленную мощность, поэтому при неисправном состоянии системы защиты ток питающей сети может возрасти до неопределенной величины, вызывая последовательное повреждение силовых элементов ТПЧ и отключение питающей сети собственной защитой.

Уровень разработки ТПЧ определяет не только КПД, выходную мощность и частоту установок индукционного нагрева. При проектировании ТПЧ должны рассматриваться также показатели надежности, которые указываются в технических требованиях на проектирование индукционной установ-

ки в целом. При этом интенсивность отказов системы аварийной защиты должна быть существенно меньше интенсивности отказов защищаемого силового устройства.

Применение статических источников электропитания в технологических установках индукционного нагрева требует разрешения ряда проблем, в частности, ограничения или снижения уровня высокочастотных токов, проникающих в питающую сеть. Для этой цели на входе автономного инвертора статического преобразователя частоты применяются индуктивные либо индуктивно-емкостные фильтры. С увеличением рабочей частоты индукционного комплекса индуктивность дросселя постоянного тока может быть уменьшена, если ограничить его функции только снижением уровня высокочастотных токов, проникающих в питающую сеть. Однако этому препятствует другая функция входного дросселя, которая заключается в ограничении амплитуды тока короткого замыкания автономного инвертора и скорости нарастания аварийного тока.

Известно, что надежность системы в целом зависит от самого ненадежного элемента, входящего в данную систему. Это может быть любой элемент инвертора, устройства защиты или цепи электроснабжения энергетической установки. Причем важность повышения надежности установок индукционного нагрева металлов обусловлена, в частности, значительными затратами на устранение даже кратковременных перерывов в работе. Поэтому проектированию устройств защиты ТПЧ необходимо уделять особенное внимание, используя все доступные методы, к которым в настоящее время относится и схемотехническое моделирование, позволяющее рассмотреть влияние на показатели надежности ТПЧ и ТКВ отдельных элементов принципиальной электрической схемы. Одним из достоинств схемотехнического моделирования в современной программно-симуляторе Micro-Cap является практически полное соответствие принципиальной схемы

проектируемого устройства его расчетной схемотехнической модели, в которой используются PSpice-описания всех компонентов и моделей силовых элементов — тиристорных и диодов [9–12].

Для моделирования была использована демо-версия программы, распространяемая в Интернете фирмой-производителем — компанией Spectrum Software. В сравнении с профессиональной демо-версией Micro-Cap имеет ряд несущественных ограничений и позволяет получить столь же точные результаты моделирования. Она также является мощным инструментом симуляции схем статических источников питания, необходимым инженерам-исследователям, разрабатывающим и проектирующим схемотехнические идеи элементов защиты ТПЧ.

Этот симулятор, как и многие другие, также использующие PSpice-описания элементов, благодаря простому и интуитивно понятному графическому интерфейсу и удобству использования позволяет освоить программу за минимальное время. Переход на Micro-Cap значительно облегчается, если пользователь знаком с другими PSpice-программами [13].

Схемотехническая модель ТПЧ с устройством аварийного отключения

Разработчики ТПЧ знают, что в настоящее время наблюдается тенденция комплексного проектирования изделий силовой электроники с устройствами их защиты. Это позволяет разработать принципиальную схему и в дальнейшем оптимизировать параметры системы аварийной защиты.

На рис. 1 показана разработанная в программе Micro-Cap 9 схемотехническая модель ТПЧ, состоящая из следующих функциональных узлов:

- источник питания — трехфазная сеть промышленной частоты с анимированным контактором;

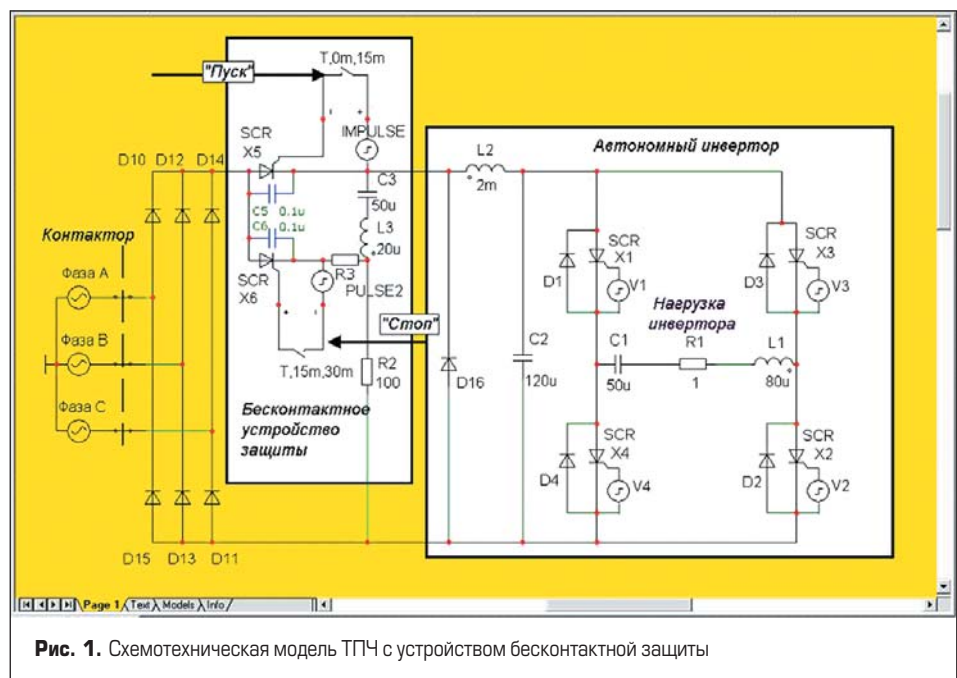


Рис. 1. Схемотехническая модель ТПЧ с устройством бесконтактной защиты

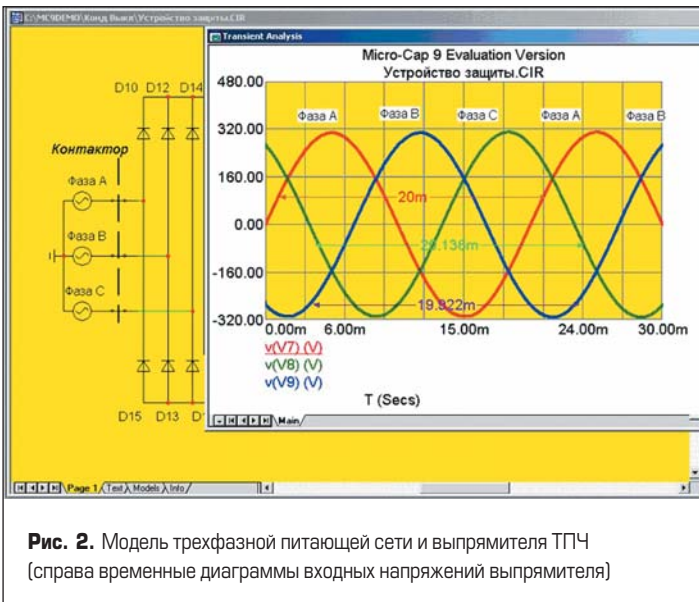


Рис. 2. Модель трехфазной питающей сети и выпрямителя ТПЧ (справа временные диаграммы входных напряжений выпрямителя)

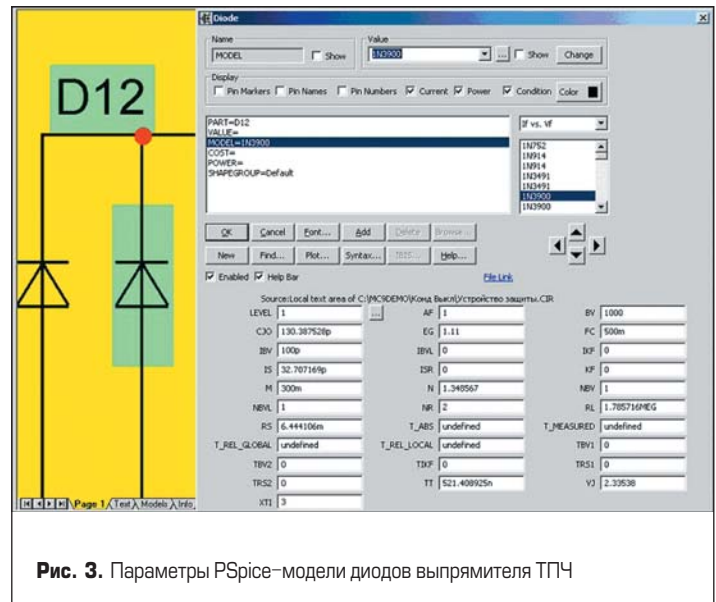


Рис. 3. Параметры PSpice-модели диодов выпрямителя ТПЧ

- неуправляемый мостовой выпрямитель;
 - бесконтактное устройство защиты;
 - тиристорный мостовой автономный инвертор тока с дросселем и нагрузкой.
- Файл программы моделирования имеет расширение .sig и содержит имена компонентов и номера узлов, к которым подключены эти компоненты, а также параметры компонентов, PSpice-моделей и макросов.

На рис. 1 приведено основное рабочее окно (page 1) схематехнической модели ТПЧ с встроенным устройством бесконтактной защиты. Электрическая схема системы защиты от аварийных режимов тиристорного преобразователя повышенной частоты соответствует ее изображению в Micro-Cap для схематехнической модели, что является важным преимуществом симулятора. В последних версиях использованной нами программы Micro-Cap 9 изображения компонентов (их условные графические обозначения — УГО) могут показываться в евро-виде или редактируются (назначаются) пользователем. Программа транслирует созданный файл схематехнической модели с расширением .sig в файл текстового описания .ckt на модификациях языка PSpice, пригодных для использования в других симуляторах или старых версиях программы. Описания моделей и макросов приводятся в специальных вкладках и доступны для редактирования пользователем.

Ниже кратко рассмотрим особенности моделирования функциональных узлов схематехнической модели ТПЧ — трехфазной сети, выпрямителя, тиристорного инвертора и конденсаторного выключателя системы аварийной защиты ТПЧ, а также приведем основные результаты исследований переходных процессов, проведенных с целью анализа коммутационной способности устройства аварийной защиты. В профессиональной версии программы Micro-Cap ограничений на количество компонентов схематехнической модели нет, поэтому она полностью соответствует исполнительной схеме ТПЧ.

При создании схематехнической модели силовой схемы ТПЧ нами приняты некото-

рые упрощения — не учитывались активные и реактивные параметры питающей сети, и в моделях силовых полупроводников параметры прямого напряжения установлены большими, чем это требуется, по отношению к реальной величине действующих напряжений. На первом этапе проектирования это обычные допущения, позволяющие выяснить диапазон работоспособности схематехнической модели.

Анализ модели трехфазной сети переменного тока промышленной частоты

Модели синусоидальных ЭДС, описывающие 3 фазы источника питания ТПЧ — симметричной сети питания 3×380 В×50 Гц, — следующие:

```
.MODEL 3PHASEA SIN (A=310 F=50 RS=10m);
.MODEL 3PHASEB SIN (A=310 F=50 PH=2.094 RS=10m);
.MODEL 3PHASEC SIN (A=310 F=50 PH=4.188 RS=10m);
```

где: A — амплитуда (В); F — частота (Гц); PH — начальная фаза (Радиан); параметр RS определяет внутреннее сопротивление источника (Ом). При исследовании коммутации выпрямителя в дальнейшем будем учитывать омическое сопротивление в фазах питающей сети путем увеличения этого сопротивления.

На рис. 2 справа показаны временные диаграммы источников напряжений 3 фаз питающей сети — v(V7), v(V8) и v(V9), образующих симметричную трехфазную систему с заземленной нейтралью. При фазном напряжении 220 В, относительно точки заземления питающей сети ТПЧ, мгновенное значение амплитудного напряжения источника составляет 310 В, а длительность одного периода — 20 мс, что определяет минимальное время расчета при схематехническом анализе аварийных процессов в ТПЧ. Порядок чередования фаз не имеет значения. Заметим, что отмеченные на рис. 2 длительности периодов фазы В (19,922 м — миллисекунд) и фазы С (20,136 м) показывают установленную точность отчетов на полученных расчетных графиках (20 м, как на фазе А).

Контактор, отделяющий питающую сеть неограниченной мощности от ТПЧ, пред-

ставленный на схематехнической модели на рис. 2 анимированными ключами [25], позволяет имитировать неисправности в сети питания ТПЧ. Заземление средней точки трех фаз питающей промышленной сети дает возможность использовать в системе защиты ТПЧ простые и эффективные датчики аварийных режимов в виде дифференциальных трансформаторов тока, подробно рассмотренных в [3].

Схематехническая модель трехфазного выпрямителя

Наиболее сложными компонентами выпрямителя ТПЧ и устройства его защиты являются PSpice-модели тиристоров и диодов. Полупроводниковые приборы, математические модели которых включены в программу PSpice, описываются большим количеством параметров. Описания моделей могут размещаться непосредственно в рабочем окне либо в отдельной вкладке.

Диоды D10-D15 (рис. 2) трехфазного мостового выпрямителя представлены в схематехнической модели PSpice параметрами 1 уровня:

```
(LEVEL) *** From file C:\MC9DEM\Olibrary\SMALL.LBR:
.MODEL 1N3900 D (LEVEL=2 BV=1000 CJO=130.387528p
IS=32.707169p M=300m N=1.348567 RL=1.785716MEG RS=6.444106m
TT=521.408925n VJ=2.33538).
```

Уровень представления этого диода в модели выпрямителя не важен для первого этапа проектирования. Определяющий параметр PSpice-модели диода выпрямителя — BV. Эта величина допустимого обратного напряжения устанавливается с необходимым запасом по отношению к максимальной. Все диоды выпрямителя используют одну PSpice-модель, что проверяется на панели параметров переключателем моделей на одном уровне.

На рис. 3 показана панель PSpice-параметров модели диодов D10-D15 выпрямителя ТПЧ. Модель диода PART D12 (типа 1N3900) выбрана из библиотечных моделей и затем скорректирована по параметрам.

Схемотехническое моделирование тиристорного мостового инвертора

При моделировании мощных тиристорных инверторов нами использовался макрос тиристора — макро-описание PSpice-модели SCR тиристора как кремниевого управляемого вентиля с соответствующей ему вольт-амперной характеристикой (ВАХ).

На рис. 4 приведены схематехническая модель и макрос тиристора. В состав макроса PSpice входит описание двух биполярных транзисторов различной полярности (.model QN и model QP) и трех неуправляемых диодов (D1 — model DJ2, D2 — model DFOR и D3 — model DJ1). Параметры макроса SCR редактируются на вызываемой панели Micro-Cap, аналогичной показанной на рис. 3. PSpice-модели транзисторов и диодов в описании макроса тиристора приводятся ниже.

PSpice-параметры макроса тиристора:

```

-SCR MACRO.parameters(IH,IGT,TON,VTMIN,VDRM,DVDT,TQ,K
1,K2);
.define RGK.75/IGT;
.define TF1 (BF1*BF2-1)*Trise/(1.8*BF1);
.define AF1.1+(IGT/(.9*IH));
.define BF2 9;
.define IS2 IS1;
.define CJC2 IH*.21/K1*sqrt(TON/DVDT);
.define AFT ((AF1*(AF1<=.9))+(.9*(AF1>.9)));
.define IS1 (POW(10,(-(VTMIN+.74)/.11)));
PSpice-параметры транзисторов и диодов:
-TRANSISTOR PARAMETERS:
.define RE1.5m;
.define TR1 1.25*K2*TQ;
.define BF1 (AFT)/(1-(AFT));
.define Trise 2*TON/3;
.define CJE1 (CJC2)*.75;
-MODEL STATEMENTS:
.model FG D (LEVEL=1 IS=10F N=1 ISR=0 NR=2 IKF=0 BV=0 IBV=100P
NBV=1 IBVL=0 NBVL=1 RS=0 TT=0 CJO=0 VJ=1 M=500M FC=500M
EG=1.11 XTI=3 TIKF=0 TBV1=0 TBV2=0 TRS1=0 TRS2=0 KF=0 AF=1
RL=0);
.model QP PNP (BF=BF1 IS=IS1 RE=RE1 CJE=CJE1 BR=BF1 TF=TF1
TR=TR1);
.model DFOR D (BV=VDRM);
.model DJ1 D (is=.001*IS1 BV=5);
.model DJ2 D (IS=.001*IS1 BV=VDRM);
.model QN NPN (BF=BF2 IS=IS2 CJC=CJC2);
    
```

На рис. 5 изображены: модель мостового тиристорного инвертора повышенной частоты с омической нагрузкой (справа); диа-

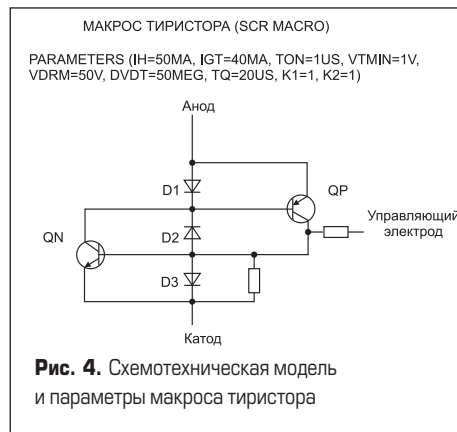


Рис. 4. Схематехническая модель и параметры макроса тиристора

грамма импульсов управления тиристорами (слева). Инвертор выполнен с диодами встречного тока (D1-D4), обеспечивающими стабилизацию напряжения на тиристорах инвертора при изменении его нагрузки, что используется в ТПЧ, применяемых в установках для индукционного нагрева металлов. При наличии постоянного напряжения на фильтровом конденсаторе C2 инвертор начинает формировать импульсы тока почти синусоидальной формы в нагрузке при включении тиристоров X1 и X2, а затем X3 и X4.

Временные диаграммы противофазных импульсов управления мостовым инвертором можно видеть в левой части рис. 5. В мостовом инверторе одновременно включаются тиристоры X1 и X2, затем импульсы управления поступают на X3 и X4. Временные интервалы между импульсами управления V1 и V3 равны 1000 мкс, противофазные тиристоры включаются симметрично (через 500 мкс). Несимметрия импульсов управления не должна превышать нескольких микросекунд, иначе возникает несимметрия амплитуды и среднего значения токов, протекающих через противофазные тиристоры автономного инвертора.

Функции системы управления противофазными тиристорами мостового тиристор-

ного инвертора в схематехнической модели определяются списком параметров:

```

.MODEL NEWMODEL1 PUL (P1=500u P2=500u P3=520u P4=520u
P5=1000u VONE=25 VZERO=-5);
.MODEL NEWMODEL2 PUL (P1=0 P2=0 P3=20u P4=20u P5=1000u
VONE=25 VZERO=-5).
    
```

Более подробно схематехническая модель тиристорного инвертора и особенности его моделирования изложены в [11].

На рис. 6 приведены параметры второго уровня моделирования (LEVEL 2) для PSpice-модели встречно-параллельных диодов инвертора. Описание модели диода инвертора, находящееся в текстовом файле устройства защиты, следующее:

```

.MODEL $GENERIC D (BV=5000).
    
```

При схематехническом моделировании в первую очередь рассматриваются условия нормальной работы тиристоров. Важной характеристикой тиристоров для автономного инвертора повышенной частоты является время выключенного состояния в сравнении с паспортным (или допустимым для PSpice-модели) временем восстановления управляемости. При условии $t_{by} < t_{br}$, где t_{by} — время, предоставляемое схемой на восстановление управляемости тиристора, а t_{br} — паспортное значение времени восстановления, тиристор может самопроизвольно включиться, что приведет к нарушению работы виртуальной схематехнической модели или реальному повреждению тиристора инвертора — это одна из вероятных причин аварийной ситуации.

Укажем другие, возможные или вероятные причины возникновения аварийной ситуации. Превышение действующих значений скорости нарастания прямого тока тиристоров — di/dt , а также скорости нарастания напряжения на них — du/dt в автономном инверторе является следующей по частоте

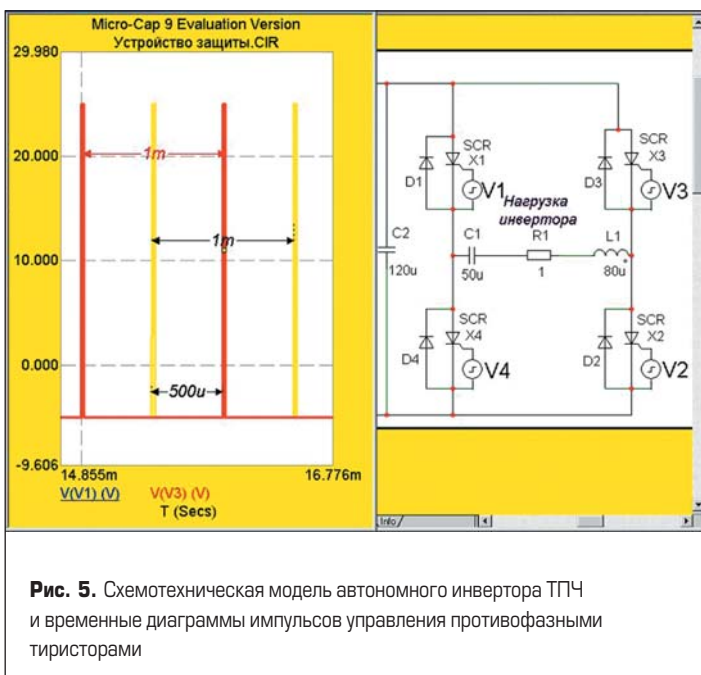


Рис. 5. Схематехническая модель автономного инвертора ТПЧ и временные диаграммы импульсов управления противофазными тиристорами

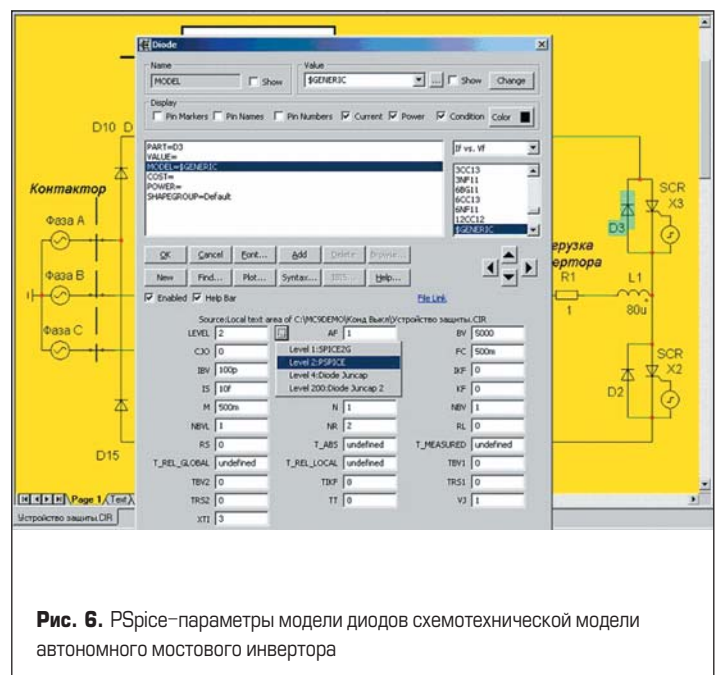


Рис. 6. PSpice-параметры модели диодов схематехнической модели автономного мостового инвертора

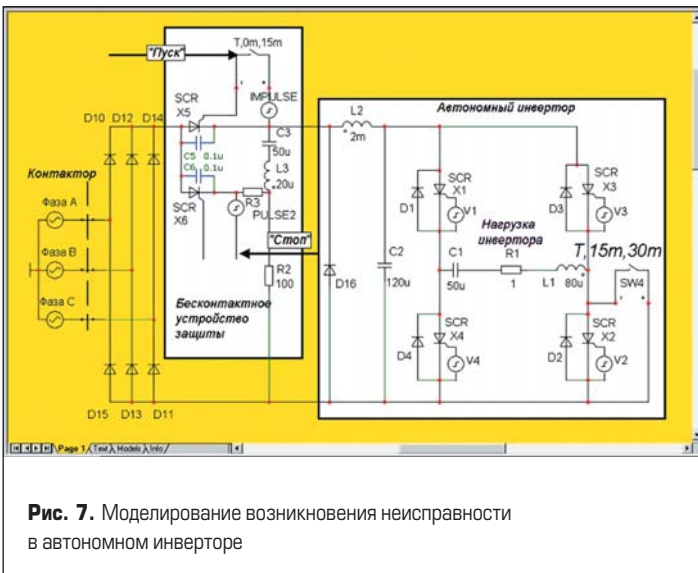


Рис. 7. Моделирование возникновения неисправности в автономном инверторе

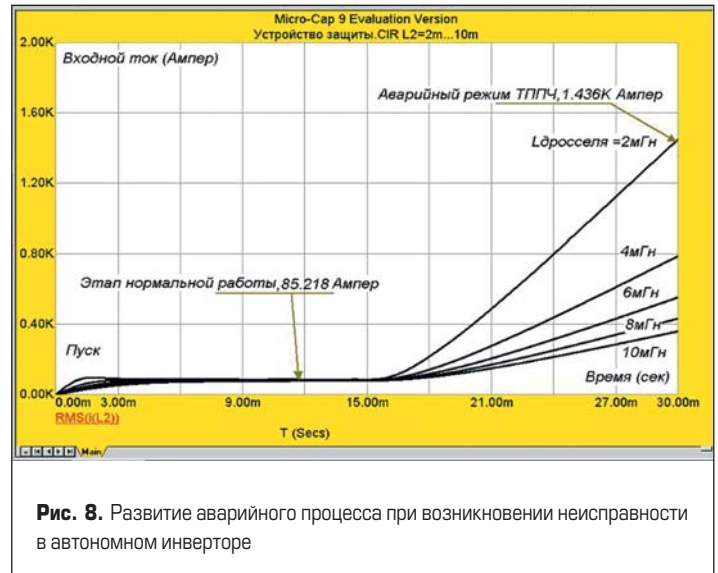


Рис. 8. Развитие аварийного процесса при возникновении неисправности в автономном инверторе

появления причинной аварийной ситуации в ТПЧ. Подробное рассмотрение выбора этих параметров с необходимым запасом для обеспечения надежности тиристорного устройства защиты приведено далее.

Рассмотрим, к чему приводит «отказ» тиристора автономного инвертора в ТПЧ. На рис. 7 изображено рабочее окно программы, в котором показана схематехническая модель ТПЧ с короткозамыкателем в виде контактора, имитирующего повреждение (непреднамеренное включение) одного тиристора мостовой схемы. Имитация повреждения тиристора сопровождается прекращением протекания высокочастотного тока в нагрузке и осуществляется замыканием модели реле времени SW4. Замыкание этого реле происходит в случайный момент времени по отношению к интервалу непроводимости тиристора и служит причиной возникновения режима короткого замыкания в инверторе. Использование в схематехнической модели нескольких реле времени позволяет имитировать задержку прохождения сигнала в системе защиты ТПЧ.

На рис. 8 приведена диаграмма входного тока инвертора в режиме его нормальной

работы и на этапе развития аварийного процесса при возникновении неисправности в автономном инверторе. Варьируемым параметром на графике является величина индуктивности входного дросселя. Временная диаграмма характеризует переходные процессы тока в выпрямителе, дросселе и тиристорах автономного инвертора с момента пуска. При нормальной работе автономного инвертора прекращение подачи импульсов управления на его тиристоры недопустимо, ибо иначе прерывается ток входного дросселя, и в схеме возникает недопустимое перенапряжение. Приведенная схематехническая модель тиристорного инвертора позволяет исследовать электромагнитные процессы, протекающие в ТПЧ при наступлении аварии, и моделировать задержку передачи импульсов управления в систему аварийной защиты.

Временная диаграмма на рис. 8 показывает возрастание входного тока инвертора при «срыве инвертирования», вызванном несанкционированным замыканием тиристора автономного инвертора. После момента срыва автоколебаний в нем оказываются включенными противофазные тиристоры.

Увеличение входного тока инвертора ограничивается в основном индуктивностью линейного дросселя постоянного тока, а текущее значение аварийного тока линейно возрастает практически до бесконечности. Ограничение скорости возрастания аварийного тока инвертора достигается увеличением индуктивности дросселя в цепи постоянного тока, при этом улучшается селективность действия контактной защиты, но возрастают потери мощности в дросселе на рабочих режимах. Участок линейного нарастания тока соответствует глухому короткому замыканию на выходе источника питания ТПЧ.

Селективность (избирательное действие) рассматриваемой системы бесконтактной защиты улучшается при введении в систему защиты быстродействующего бесконтактного выключателя аварийных режимов, вызванных внешними и внутренними по отношению к ТПЧ причинами.

Далее мы разберем и другие причины, способные вызвать необходимость срабатывания системы аварийной защиты ТПЧ, и выявим динамику прерывания аварийных процессов. Для этого более подробно рассмотрим разработан-

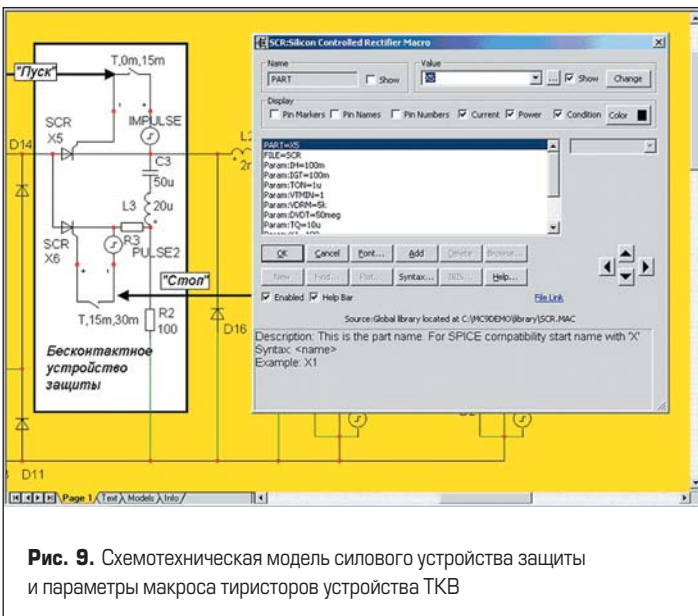


Рис. 9. Схематехническая модель силового устройства защиты и параметры макроса тиристорного устройства ТКВ

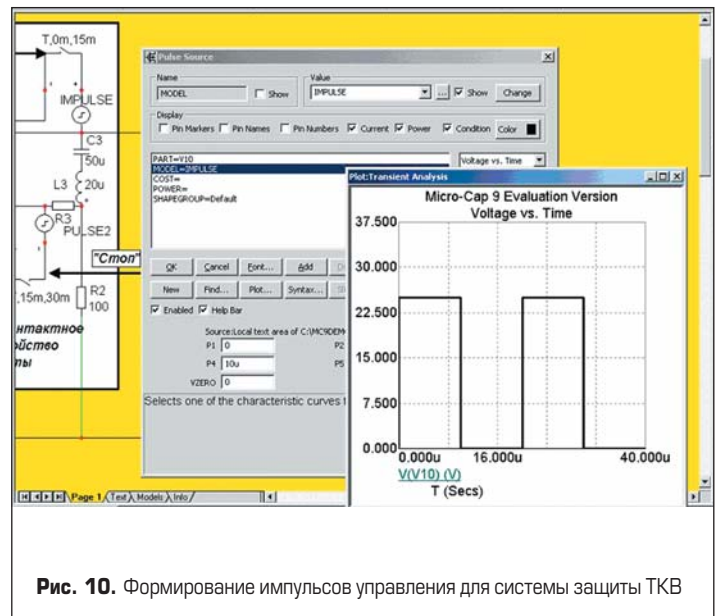


Рис. 10. Формирование импульсов управления для системы защиты ТКВ

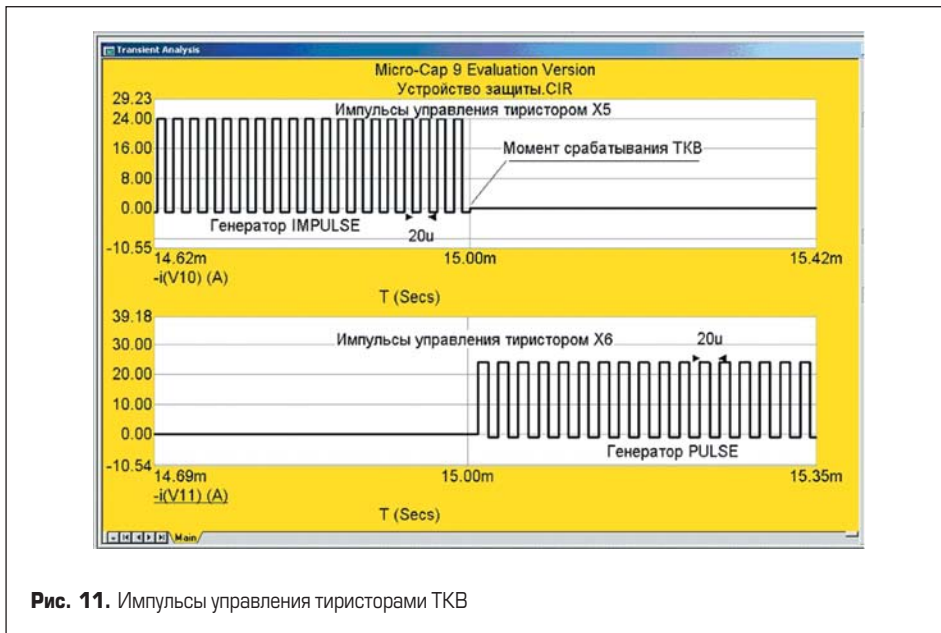


Рис. 11. Импульсы управления тиристорами ТКВ

ную нами схемотехническую модель быстродействующего конденсаторного выключателя, основанную на принципе принудительного выключения силового последовательного тиристора ТКВ путем емкостной коммутации вспомогательным тиристором, который включается от датчика системы аварийной защиты.

Схемотехническое моделирование тиристорно-конденсаторного выключателя системы аварийной защиты ТПЧ

На рис. 9 слева приведен фрагмент схемотехнической модели для электрической схемы ТПЧ с бесконтактным устройством защиты. Бесконтактный конденсаторный выключатель ТПЧ выполнен с применением моделей силовых тиристоров — последовательного тиристора (SCR X5) и вспомогательного тиристора бесконтактного выключателя (SCR X6), а также коммутирующего конденсатора защиты (C3). Другие элементы схемы бесконтактного выключателя выполняют следующие функции:

- индуктивность L3 и резистор R3 ограничивают амплитуду тока и предотвращают возникновение ВЧ-колебаний в контуре выключателя;
 - резистор R2 обеспечивает предварительный заряд конденсатора защиты перед приведением ее в действие;
 - контакты «Пуск» и «Стоп», совместно с источниками импульсных сигналов IMPULSE и PULSE2, обеспечивают включение/выключение силовых тиристоров устройства ТКВ. Параметры макроса для схемотехнической модели тиристоров устройства защиты показаны в панели под названием SCR (Silicon Controlled Rectifier Macro), приведенной на рис. 9.
- На рис. 10 показана панель PSpice-параметров генератора импульсов (IMPULSE в схемотехнической модели), имитирующего форму импульсов управления для тиристоров ТКВ. Тиристоры включаются и поддерживаются во включенном состоянии импульсными сигналами высокой частоты, это позволяет повысить быстродействие переключения и уменьшить мощность управления тиристорами в сравнении с потенциальным управлением. Форма управляющих импульсов

прямоугольная, амплитуда 25 В, частота импульсов 20 мкс. Временной график импульсов генератора V10 (IMPULSE) показан на рис. 10 справа.

На рис. 11 показано рабочее, активное окно симулятора Micro-Cap (Transient Analysis), на котором изображены диаграммы импульсов управления тиристорами конденсаторного выключателя. В схемотехнической модели устройства защиты включенное состояние «проходного» тиристора в режиме готовности поддерживается высокочастотными импульсами (период 20 мкс) от генератора IMPULSE. Эти импульсы отключаются, когда генератор PULSE2 подключается к тиристорам защиты SCR X6, обеспечивая его включение.

Импульсные функции схемотехнической модели устройства защиты IMPULSE и PULSE2 задаются списком параметров:

```
.MODEL IMPULSE PUL (P1=0 P2=0 P3=10u P4=10u P5=20u VONE=25)
.MODEL PULSE2 PUL (P1=10u P2=10u P3=20u P4=20u P5=20u VONE=25).
```

Эти параметры определяются требуемой формой импульсов управления тиристорами конденсаторного выключателя.

На рис. 12 приведен график изменения входного тока автономного инвертора (в данном случае это ток линейного дросселя L2 на входе инвертора) в случае принудительного отключения тиристорного инвертора устройством защиты.

Этот график иллюстрирует действие системы защиты, так как потребляемый из сети ток, проходящий через выпрямитель и дроссель инвертора, резко уменьшается при коротком замыкании в тиристорном инверторе — в отличие от показанного на рис. 8. Задержка в срабатывании ТКВ не превышает одного периода высокой частоты инвертора. Накопленная энергия входного дросселя рассеивается в тиристорном мосту инвертора.

На рис. 13 показана временная диаграмма выходного тока инвертора при его отключении системой аварийной защиты. Прекращение колебаний выходного тока инвертора, обеспечиваемых запасенной электромагнитной энергией дросселя постоянного тока, происходит за несколько периодов вы-

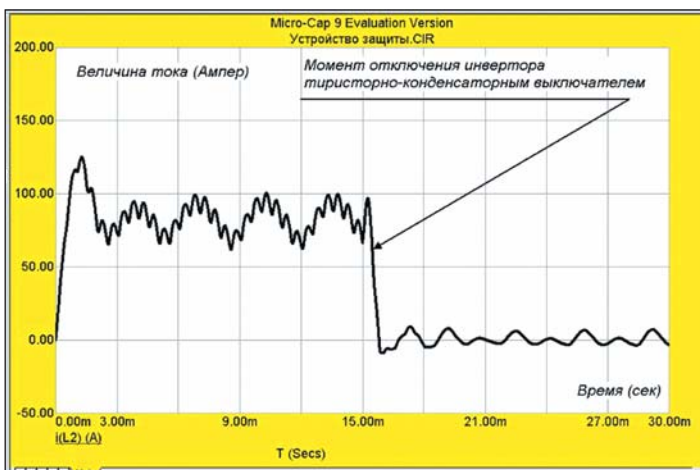


Рис. 12. График изменения входного тока автономного инвертора при его отключении тиристорно-конденсаторным выключателем

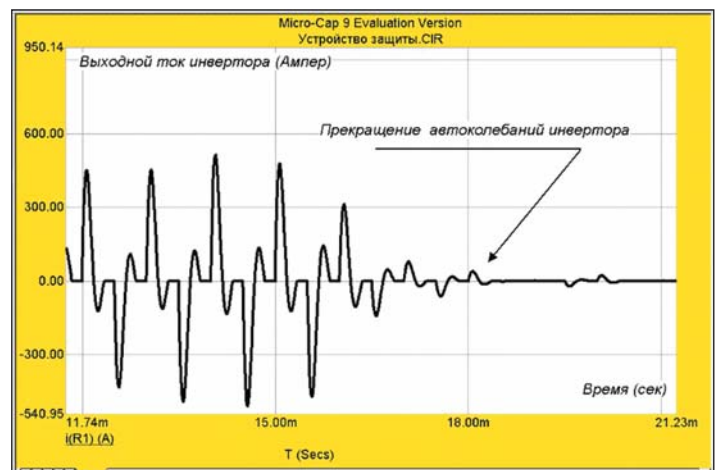


Рис. 13. Временная диаграмма выходного тока инвертора при отключении системой аварийной защиты с помощью ТКВ

сокой частоты, при этом входной ток инвертором не потребляется.

Мы показали некоторые преимущества применения в системе аварийной защиты ТПЧ быстроедействующего бесконтактного тиристорно-конденсаторного выключателя. В продолжении статьи будет рассмотрена коммутационная способность ТКВ устройства защиты, ее эффективность и требования к ней для применения в ТПЧ различной мощности.

Окончание следует

Литература

1. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат. 1989.
2. Глух Е. М., Зеленов В. Е. Защита полупроводниковых преобразователей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат. 1982.
3. Зинин Ю. М., Ройзман Ю. П. Тиристорный преобразователь для индукционного нагрева металлов. Академия наук Республики Башкортостан. НТД № 95-4. 1995.
4. Зинин Ю. Исследование функциональных узлов источника питания для индукционного высокочастотного комплекса. http://power-e.ru/2008_2_86.php.
5. Зинин Ю., Белкин А. Принудительное выключение тиристорных выпрямителей в преобразователях частоты для установок индукционного нагрева металлов. http://power-e.ru/2010_01_36.php.
6. Валиуллина З., Есаулов А., Егоров А., Зинин Ю. Особенности проектирования силовых выпрямителей в качестве источников постоянного тока для тиристорных преобразователей повышенной частоты. <http://power-e.ru/469.php>.
7. Валиуллина З., Зинин Ю. Исследование схемотехнической модели тиристорного преобразователя частоты с вакуумной индукционной плавильной печью. http://power-e.ru/2008_1_88.php.
8. Зинин Ю. Проектирование регулируемых тиристорных преобразователей повышенной частоты. <http://power-e.ru/451.php>.
9. Валиуллина З., Зинин Ю. Схемотехническое моделирование силовых дросселей для тиристорных преобразователей повышенной частоты. http://power-e.ru/2007_01_74.php.
10. Валиуллина З., Егоров А., Есаулов А., Зинин Ю. Исследование средствами схемотехнического моделирования нелинейного дросселя переменного тока в составе тиристорного высокочастотного инвертора. http://power-e.ru/2008_2_124.php.
11. Зинин Ю., Рахимова И. Мостовая схема тиристорного инвертора тока для установок индукционного нагрева металлов. <http://power-e.ru/569.php>.
12. Зинин Ю., Шапиро С. Дифференциальные датчики систем аварийной защиты в тиристорных преобразователях повышенной частоты для индукционного нагрева металлов. http://power-e.ru/2009_5_98.php.
13. Златин И. Новые возможности программы схемотехнического моделирования Micro-Cap // Компоненты и технологии. 2007. № 10.
14. Чаки Ф., Герман И., Ипшич И. и др. Силовая Электроника. Примеры и расчеты / Пер. с англ. М.: Энергоиздат. 1982.
15. Зинин Ю. М., Васюра В. В., Дубов С. А. Устройство защиты трехфазного мостового тиристорного выпрямителя. Академия наук РБ. НТД № 81-5. 1981.
16. А. с. № 481964 (СССР) Устройство защиты источника питания / С. М. Кацнельсон, Ю. М. Зинин, А. М. Иванов, А. М. Уржумсков, П. С. Ройзман. // Б. И. 1975. №31.
17. А. с. № 513440 (СССР) Способ защиты трехфазного мостового тиристорного выпрямителя / Ю. М. Зинин, А. В. Иванов, В. А. Пацкевич, А. М. Уржумсков // Б. И. 1976. №17.
18. Зинин Ю. М., Терешкин В. В. Выявление критерия надежности системы бесконтактной защиты электроэнергетического оборудования. Межвуз. научн. сб. «Электротехнические комплексы и системы». Уфа: УГАТУ. 2001.
19. Зинин Ю. М. Анализ интервала восстановления управляемости тиристора в несимметричном инверторе // Электричество. 2006. № 10.
20. Зинин Ю. М. Анализ гармоник выходного тока тиристорных полирезонансных инверторов // Электричество. 2008. № 8.